

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE CARGAS RESIDENCIAIS TERMOSTÁTICAS PARA A RECOMPOSIÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO A PARTIR DE UMA ABORDAGEM ORIENTADA A OBJETOS

Lia Toledo Moreira Mota*

lia@dsee.fee.unicamp.br

Alexandre de Assis Mota*

assis@dsee.fee.unicamp.br

André L. Morelato França*

morelato@dsee.fee.unicamp.br

*Departamento de Sistemas de Energia Elétrica, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Av. Albert Einstein, 400, Cidade Universitária, Caixa Postal 6101 CEP 13081-970 Campinas (SP) - Brasil

ABSTRACT

This work is about load modeling in power system restoration after blackouts. The behaviour of residential thermostatically controlled loads is analyzed, since they are the main responsible for the growth of demand after reenergization. Load modeling is implemented using Oriented Object Programming (OOP). OOP techniques take advantage of physical modeling of residential thermostatically controlled equipment and use a reduced number of classes to represent them. Load aggregation is also implemented using “residence” and “feeder” classes in an hierarchical structure.

KEYWORDS: Power system restoration, load modeling, object oriented programming, cold load pick-up.

RESUMO

Este trabalho trata da modelagem da carga no processo de recomposição do sistema de energia elétrica após a ocorrência de blecautes. Em especial, é analisado o comportamento de cargas residenciais termostáticas, que são as principais responsáveis pelo aumento da de-

manda pós-perturbação, e cujo conhecimento é essencial na recomposição do sistema. A modelagem é construída a partir de técnicas de programação orientada a objetos que valoriza a modelagem física dos equipamentos elétricos residenciais através da implementação de um número reduzido de classes correspondentes aos equipamentos termostáticos. A agregação das cargas é também realizada usando a mesma filosofia, a partir da definição hierárquica dos componentes de uma subestação de distribuição típica, como alimentadores e residências.

PALAVRAS-CHAVE: Recomposição de sistemas elétricos, modelagem da carga pós-blecautes, programação orientada a objetos.

1 INTRODUÇÃO

O problema da recomposição em sistemas de energia elétrica consiste no restabelecimento de energia aos consumidores, após a ocorrência de blecautes, de forma a minimizar tanto o tempo requerido para efetuar as operações de controle quanto o desconforto do consumidor. Um dos fatores determinantes para decidir qual a sequência correta de ações de controle é o conhecimento, de antemão, do comportamento da carga no instante do restabelecimento de energia. Neste cenário, cargas residenciais de resfriamento ou aquecimento podem apre-

Artigo submetido em 09/08/02

1a. Revisão em 22/04/03

Aceito sob recomendação do Ed. Assoc. Prof. Glauco Taranto

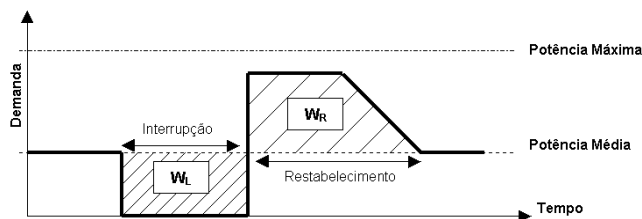


Figura 1: Modelo linearizado do comportamento da carga durante a recomposição

sentar, dependendo da duração da interrupção, valores anormais de demanda no momento de seu restabelecimento, em comparação aos valores nominais. Estes valores anormais podem provocar problemas durante a reenergização de cargas na fase fluente da recomposição da rede elétrica (quando as reenergizações estão sendo feitas independentemente por cada concessionária e o sistema se encontra mais vulnerável a novos colapsos). As características dessa fase serão melhor descritas no item 6.

Na literatura, o comportamento da carga durante o restabelecimento de energia é descrito por modelos simplificados, definidos por uma trajetória da carga onde a energia “perdida” durante a interrupção deve ser recuperada logo após o restabelecimento de energia, conforme ilustrado na figura 1.

Este tipo de curva, embora adequado para determinar o comportamento geral de um alimentador residencial durante a recomposição do sistema, não permite que a dependência da carga com relação a variáveis externas (como, por exemplo, a temperatura ambiente) seja avaliada. Tendo em vista esses aspectos, neste trabalho foi adotada uma filosofia de orientação a objetos para modelar o comportamento de cargas residenciais, representando os elementos responsáveis pela demanda controlada termostaticamente (geladeiras, aparelhos de ar-condicionado, etc.) de maneira independente e agregando-os de forma hierárquica, preservando, assim, as características aleatórias independentes de cada objeto (elemento) no cenário completo. É importante ressaltar que os modelos desenvolvidos não consideram os aspectos transitórios envolvidos no processo de retomada de carga, enfocando, principalmente, os impactos causados pela retomada da operação.

2 CARACTERÍSTICAS DA DEMANDA EM ÁREAS RESIDENCIAIS

O estudo sobre o comportamento da carga na recomposição de sistemas de energia elétrica é de fundamental

importância, uma vez que o restabelecimento de uma carga pode representar uma demanda muito maior que aquela sob condições normais de operação e, conseqüentemente, produzir sobrecarga de linhas e transformadores, queda de frequência e, eventualmente, situações onde a demanda seja maior que a capacidade de geração do sistema elétrico ou de parte dele. Além disso, o conhecimento do comportamento da carga na recomposição da rede elétrica permite um aumento na efetividade dos desligamentos de carga programados.

O problema do restabelecimento de cargas após a ocorrência de blecautes vem sendo analisado há algumas décadas. Existem relatos mostrando que já nas décadas de 1940 e 1950, as empresas de energia enfrentaram dificuldades durante a religação de disjuntores (Agneholm, 1999).

O restabelecimento de cargas após a ocorrência de uma interrupção é designado na literatura por “tomada de carga a frio” e consiste no restabelecimento de energia a uma carga após a ocorrência de uma falha no fornecimento de energia. Quando isso ocorre, os aparelhos controlados termostaticamente são os maiores responsáveis pelo aumento da demanda no instante da reenergização, pois todos eles estarão com os motores prontos para partir (perda da diversidade entre os estados destes dispositivos), fato que não ocorre em condições normais de operação.

Na literatura relacionada a esse tema, o problema do restabelecimento de cargas após falha no fornecimento de energia encontra-se dividido nas seguintes fases (Agneholm, 1999):

- corrente de surto no filamento de lâmpadas e em transformadores; duração: alguns ciclos;
- corrente de partida de motores; duração: aproximadamente 1 s;
- corrente de aceleração de motores; duração: aproximadamente 15 s e
- perda da diversidade entre os dispositivos controlados termostaticamente; duração: algumas horas.

A perda da diversidade entre os dispositivos controlados termostaticamente pode ser entendida com base no princípio de funcionamento de um aparelho de ar condicionado: se a temperatura do ambiente no qual ele está inserido for maior que uma certa temperatura previamente estabelecida no controle do aparelho, o equipamento é ligado; por outro lado, se a temperatura interna for menor ou igual à temperatura de controle, o

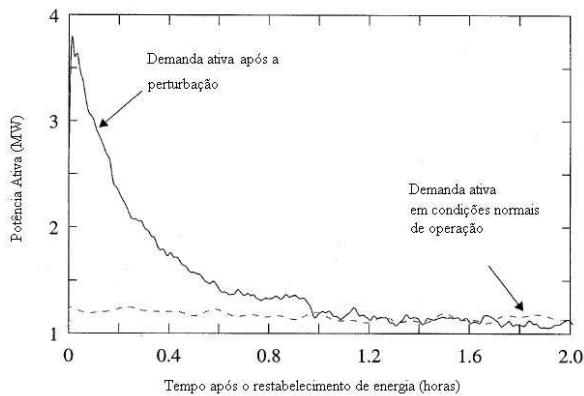


Figura 2: Demanda ativa em uma área residencial após um blecaute de aproximadamente 3 horas

equipamento é desligado (controle on-off). Assim, em condições normais de operação do sistema elétrico, existem aparelhos de ar condicionado ligados e outros desligados, ou seja, existe uma diversidade no estado destes aparelhos. Entretanto, no momento da ocorrência de uma falha no fornecimento, todos os aparelhos são desligados, provocando um aumento da temperatura no ambiente controlado. Dependendo do tempo de duração da interrupção e da temperatura do ambiente externo, quando o restabelecimento da carga for iniciado, todos os aparelhos de ar condicionado poderão estar ligados, uma vez que a temperatura interna tornou-se maior que a temperatura de controle dos equipamentos. Desta maneira, pode haver perda da diversidade entre os estados dos dispositivos controlados termostaticamente. A figura 2 ilustra a demanda ativa em uma área tipicamente residencial após um blecaute de aproximadamente 3 horas (Agneholm, 1999). É importante notar que no instante do restabelecimento da energia e nos momentos subsequentes, a demanda é muito maior que aquela observada sob condições normais de operação.

A figura 3 representa a demanda ativa, após blecautes de curta duração (5 minutos e 30 minutos), para uma área residencial onde 84% das residências possuam aquecedores elétricos (Agneholm, 1999).

Pode-se observar que a demanda após a reenergização aumenta conforme aumenta a duração do blecaute, assim como o pico da demanda, em consequência da perda de diversidade entre os aquecedores. Quanto maior a duração do blecaute, maior a quantidade de aparelhos que vai estar ligada no momento do restabelecimento de energia. Entretanto, para blecautes de longa duração, o pico de potência não cresce linearmente com a duração do blecaute, uma vez que após um certo tempo de

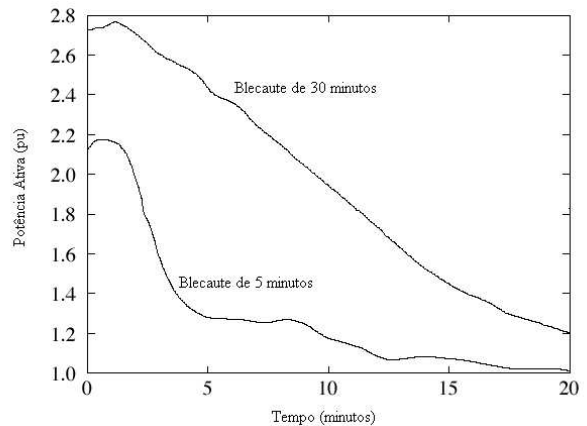


Figura 3: Demanda após blecautes de 5 e 30 minutos de uma área tipicamente residencial

duração, todos os aquecedores deverão estar ligados no momento do restabelecimento de energia.

Deve-se salientar que a utilização dos equipamentos, tipicamente residenciais, depende do estilo de vida dos habitantes, o que engloba características bastante subjetivas, além de uma série de fatores como, por exemplo, o número de habitantes da casa, o dia da semana, a época do ano, etc. Dentre os fatores subjetivos e socioeconômicos que determinam a utilização destes equipamentos domésticos estão, por exemplo (Capasso, 1994): horário das refeições, horário de dormir, horários de saída para o trabalho, horários de cozinhar, de tomar banho, de lazer, etc.

3 MODELAGEM DE EQUIPAMENTOS RESIDENCIAIS CONTROLADOS TERMOSTATICAMENTE

Neste item, são exploradas as características dos equipamentos residenciais mais comuns controlados termostaticamente (como aparelhos de ar condicionado e aquecedores), visando a obtenção de modelos simplificados que descrevem seu funcionamento individual.

3.1 Aparelhos de ar condicionado

Como mencionado, os aparelhos de ar condicionado são equipamentos típicos controlados termostaticamente. A equação a seguir representa um modelo matemático que expressa o funcionamento desse tipo de equipamento (Mortensen e Haggerty, 1990):

$$\frac{dT}{dt} = \frac{-1}{\tau} (T - T_f - W.T_g) \quad (1)$$

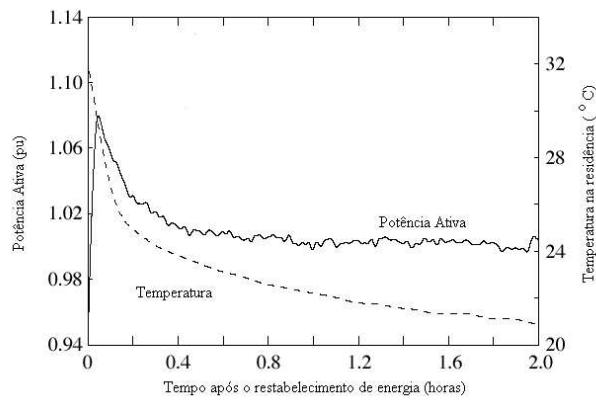


Figura 4: Demanda ativa e temperatura da residência após um blecaute

em que:

- T corresponde à temperatura média interna do ambiente no qual o aparelho está operando, [$^{\circ}\text{C}$];
- t corresponde ao tempo, [s];
- T_f corresponde à temperatura alvo, [$^{\circ}\text{C}$];
- τ corresponde à constante de tempo térmica do ambiente, [s];
- T_g é negativo e corresponde ao ganho de temperatura sobre T_f ou à capacidade de aquecimento relativa ao ganho de calor do ambiente no qual o aparelho está operando, [$^{\circ}\text{C}$];
- W corresponde ao status do termostato (0→desligado ou 1→ligado);

A figura 4 ilustra a demanda ativa para um aparelho de ar condicionado após um blecaute (Agneholm, 1999):

Pode-se observar que no momento do restabelecimento de energia a temperatura na residência estava bastante elevada, devido à interrupção do funcionamento do ar condicionado. Esta temperatura vai caindo a partir do momento em que o dispositivo volta a funcionar. Nota-se também que, nesse instante, ocorre um pico na demanda ativa do aparelho que leva algum tempo para voltar a operar com sua demanda nominal.

3.2 Geladeiras e freezers

Como não existem dispositivos de proteção responsáveis pelo desligamento de geladeiras e freezers após a ocorrência de uma perturbação, pode-se considerar que estes

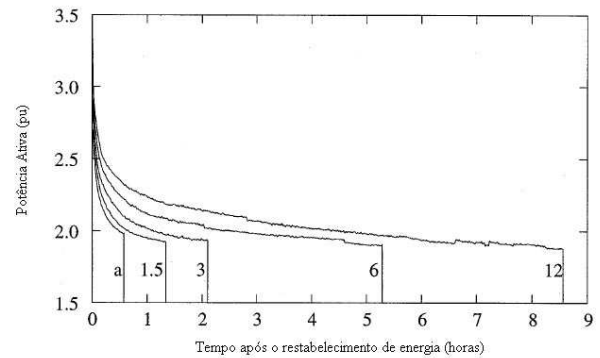


Figura 5: Demanda ativa de uma geladeira sob operação normal (a) e após blecautes de 1.5, 3, 6 e 12 horas

equipamentos estarão ligados no início do processo de restabelecimento de cargas. Além disso, como também são controlados termostaticamente, ocorre, assim como no caso dos aparelhos de ar condicionado, uma perda de diversidade entre eles e um conseqüente aumento na demanda após o restabelecimento. A figura 5 representa a demanda ativa de uma geladeira após blecautes de diferentes durações (Agneholm, 1999):

Pode-se observar que a demanda aumenta conforme cresce a duração do blecaute. Isto se deve à perda de energia térmica do dispositivo que deve ser recuperada após o restabelecimento de energia. Essa perda de energia provoca a perda de diversidade entre as geladeiras. Quanto maior a duração do blecaute, maior a quantidade de aparelhos que vão estar ligados no momento do restabelecimento de energia, maior a diferença entre a temperatura interna da geladeira e a temperatura desejada (regulada no termostato) e, portanto, maior a demanda para que os aparelhos possam atingir esta temperatura. Entretanto, para blecautes de longa duração (acima de 60 minutos), não se verifica um aumento do pico de demanda com o aumento da duração dos blecautes, pois a partir de certo tempo de duração, todos os aparelhos deverão estar ligados no momento do restabelecimento de energia. Além disso, é importante ressaltar que, no caso de geladeiras e freezers, o pico de potência no momento do restabelecimento, tomado em relação à demanda em regime, é consideravelmente maior que no caso dos aparelhos de ar condicionado (Agneholm, 1999).

3.3 Fornos elétricos, chuveiros e ferros de passar roupa

O comportamento destes equipamentos durante o restabelecimento de cargas depende, em grande parte, de atitudes tomadas pelos usuários. Por exemplo, se o tempo de duração da falha no abastecimento de energia for muito grande, o usuário provavelmente parará de preparar o alimento, tomar banho ou passar roupa e, conseqüentemente, desligará esses equipamentos. Entretanto, se a perturbação for sanada rapidamente (em apenas alguns minutos), o usuário provavelmente não desligará os aparelhos. Assim, quando o restabelecimento de carga for iniciado, esses equipamentos estarão ligados e como também são controlados termostaticamente, poderão proporcionar um aumento da demanda com relação ao nível antes da perturbação.

3.4 Máquinas de lavar roupa, secadoras e máquinas de lavar louça

Existem, basicamente, dois tipos de máquinas de lavar e de secar. No primeiro tipo, o religamento após uma perturbação deve ser manual, enquanto que no segundo tipo a máquina continua realizando as atividades, para as quais havia sido programada, após o restabelecimento. No caso de grandes máquinas de lavar roupas pertencentes a lavanderias, quando ocorre uma falha no abastecimento de energia, elas são completamente drenadas. Assim, durante o processo de restabelecimento, elas têm que ser cheias novamente com água, que deve ser aquecida mais uma vez. Como conseqüência desse aquecimento, durante o processo de restabelecimento de carga, essas máquinas requerem potência máxima da rede (Agneholm, 1999).

3.5 Aquecedores

Assim como os aparelhos de ar condicionado, os aquecedores também são controlados termostaticamente. Desse modo, haverá também uma perda da diversidade entre os aquecedores, aumentando a carga após o restabelecimento de energia. A equação a seguir representa um modelo matemático que expressa o funcionamento desse tipo de equipamento e corresponde à mesma equação utilizada para os aparelhos de ar condicionado, exceto que, neste caso, T_g é positivo (Mortensen e Haggerty, 1990):

$$\frac{dT}{dt} = \frac{-1}{\tau} (T - T_f - W.T_g) \quad (2)$$

4 AGREGAÇÃO DE CARGAS

A agregação das cargas consiste na integralização de todas as demandas individuais de um alimentador. Geralmente, duas diferentes abordagens são empregadas neste problema. A primeira consiste em modelar a curva de demanda total de um alimentador particular, através de um método apropriado de identificação, por exemplo, a partir de séries temporais de medições. Esta abordagem tem a vantagem de ser simples, requerendo um esforço computacional correspondente apenas ao método de identificação analítico a ser empregado.

A segunda abordagem consiste em modelar individualmente cada equipamento, simulando o seu comportamento durante o dia e a partir daí totalizar a demanda somando os perfis de consumo obtidos. Este método é significativamente mais trabalhoso que o método anterior, além de não fornecer explicitamente um modelo para a demanda agregada, caso em que é necessário o emprego adicional de um método de identificação adequado.

Entretanto, essa última abordagem permite que diferentes modelos sejam empregados para equipamentos distribuídos em um mesmo alimentador, possibilitando que resultados mais precisos sejam obtidos para descrever o comportamento da carga agregada.

Uma vez que o principal interesse da etapa de planejamento da recomposição é determinar, o mais exatamente possível, o comportamento do sistema durante a reenergização (uma vez que, nessas condições, o sistema frequentemente estará próximo aos seus limites de estabilidade), o emprego da modelagem individual de equipamentos por alimentador torna-se vantajoso, já que o fator tempo tem papel secundário nas atividades de planejamento.

5 APLICAÇÃO DE PROGRAMAÇÃO ORIENTADA A OBJETOS

Diante dos aspectos apresentados no item anterior, torna-se muito atraente a aplicação de técnicas de programação orientada a objetos. Essa filosofia de programação valoriza a modelagem física dos equipamentos elétricos residenciais através da implementação de um número reduzido de classes correspondentes aos equipamentos. A agregação das cargas pode ser então realizada através da definição hierárquica dos componentes envolvidos no problema, tais como alimentadores e residências. As características deste tipo de programação, assim como os modelos adotados neste trabalho, são descritos a seguir.

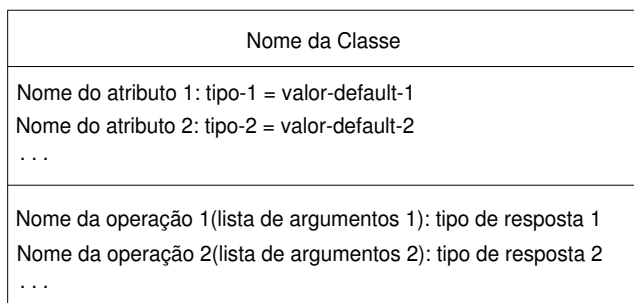


Figura 6: Diagrama de Classe

5.1 Conceitos básicos

Programação orientada a objetos (ou Oriented Object Programming – OOP) é uma técnica de programação na qual o problema a ser abordado é modelado como sendo constituído por um conjunto de objetos que interagem entre si. Os conceitos básicos de orientação a objeto são (Campione e Walrath, 1996):

Classe: Uma classe é definida como um molde ou gabarito através do qual serão definidos os objetos. Assim, classe é um protótipo que define os métodos e atributos comuns a um conjunto de objetos de um mesmo tipo.

Objeto: Um objeto é uma instância de uma classe. Ele representa uma entidade, conceito ou abstração individual pertinente ao domínio do problema sob análise.

Atributos: Um atributo é uma propriedade do objeto. Eles representam a informação contida, na forma de variáveis ou constantes, dentro do objeto definido, registrando o estado atual do mesmo.

Métodos: Representam o conjunto de operações que um objeto pode realizar. Basicamente, são sub-rotinas que manipulam variáveis locais, atributos próprios ou de outros objetos e parâmetros por passagem de valor.

Herança: O mecanismo de herança permite que características comuns a um determinado conjunto de classes possam ser derivadas a partir de uma classe base, reaproveitando declarações e estruturas já existentes.

Durante o desenvolvimento de projetos orientados a objetos, podem ser obtidos alguns modelos, dentre os quais o mais popular é o diagrama de classe resultante da aplicação da técnica OMT – Object Modeling Technique (Rumbaugh, 1991). Estes diagramas descrevem as funcionalidades e atributos inerentes ao problema para as diferentes classes, seguindo o padrão ilustrado na figura 6.

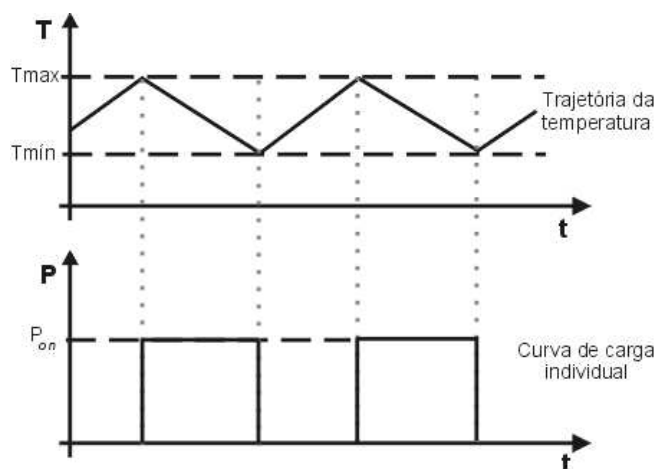


Figura 7: Ciclo termostático em operação normal

Nesse diagrama, dividido em três diferentes campos, o nome da classe é apresentado primeiramente. Em seguida, são listados os atributos e campos pertencentes aos objetos desta classe, explicitando o seu nome, tipo e, quando possível, seu valor de inicialização. Finalmente, são apresentados os métodos da classe, descrevendo o seu nome, lista de argumentos e tipo de valor retornado. Esses campos devem ser separados por uma linha horizontal.

5.2 Modelo OOP de equipamentos termostáticos

Quanto à sua funcionalidade, o modelo geral de um equipamento termostático pode ser derivado a partir do comportamento físico do dispositivo, relacionando sua temperatura interna e estados de funcionamento. Em condições normais de operação (isto é, em regime), a temperatura de referência de um equipamento termostático é mantida entre dois valores previamente definidos de temperatura: um limite de temperatura superior (T_{mx}) e um de temperatura inferior (T_{mn}). Conforme descrito anteriormente, o controle da unidade de refrigeração/aquecimento é normalmente realizado através de um mecanismo do tipo liga/desliga acionado nas temperaturas limites. A demanda elétrica do equipamento, neste caso, pode ser considerada constante e existente somente nos intervalos em que a unidade de refrigeração/aquecimento está ligada. A figura 7 ilustra o ciclo termostático de temperatura e demanda ao longo do tempo para um equipamento de refrigeração interna, operando em condições normais:

Já durante a ocorrência de uma interrupção, o equipamento perde a capacidade de executar a parcela do ci-

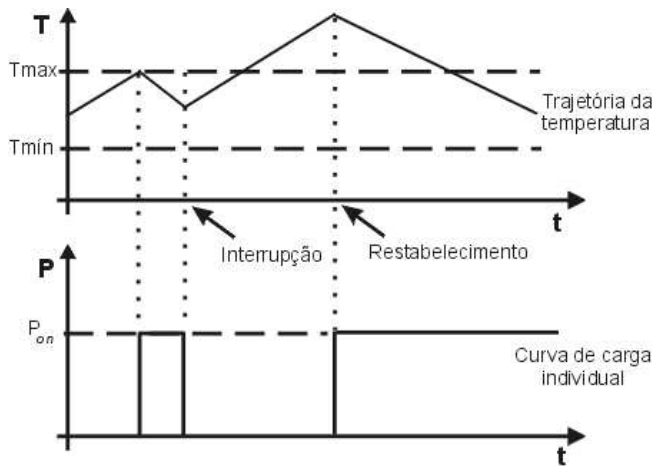


Figura 8: Ciclo termostático alterado após blecautes

clo termostático correspondente ao seu estado “ligado”. Nesta situação, a temperatura de referência do equipamento pode ultrapassar os limites estabelecidos previamente, retirando o mesmo do seu estado normal. O que ocorre neste caso é uma perda de energia térmica geral que reflete nas alterações da temperatura. Portanto, no instante do restabelecimento, o equipamento executará um ciclo “ligado” de duração maior que em condições normais de operação, até que a sua temperatura de referência se encontre novamente entre os limites máximo e mínimo estabelecidos previamente. A figura 8 ilustra um caso típico de alteração do ciclo termostático para um equipamento de refrigeração interna:

O acúmulo dessas alterações no ciclo termostático após as interrupções, para todos os equipamentos temostáticos existentes em um alimentador, é que resulta na sobrecarga temporária observada na recomposição de subestações de distribuição tipicamente residenciais.

Nos modelos utilizados neste trabalho, por facilidade de implementação, a variação da temperatura se dá de maneira linear com relação ao tempo. Esta variação, entretanto, pode assumir outros tipos de comportamento (exponencial, por exemplo), e pode ser facilmente substituída no modelo original considerando a implementação orientada a objetos.

Assim sendo, ambos os comportamentos (em condições normais de operação e durante a ocorrência de blecautes) adotados neste trabalho podem ser descritos de maneira discreta no tempo, para cada equipamento termostático envolvido no problema, pelas equações a seguir:

$$T_i = T_{i-1} + \alpha \cdot \Delta t \quad (3)$$

$$P_i^e = m_i \cdot P_{on} \quad (4)$$

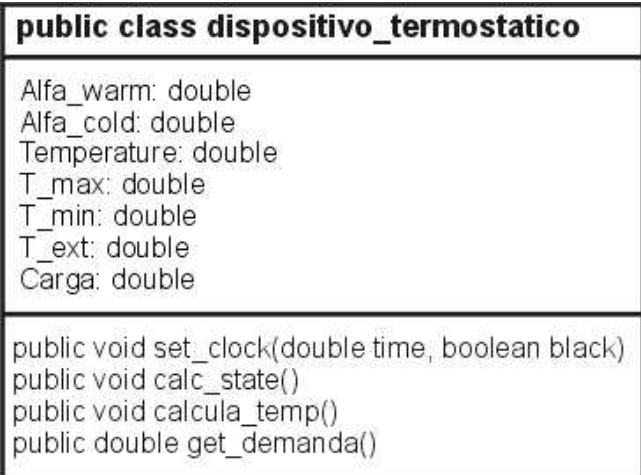


Figura 9: Diagrama de classe de um dispositivo termostático genérico

em que:

- T_i : temperatura de referência no instante i ;
- α : coeficiente térmico (resfriamento ou aquecimento);
- P_i^e : demanda do equipamento e no instante i ;
- m : variável lógica de estado; $m=0 \rightarrow$ desligado; $m=1 \rightarrow$ ligado;
- P_{on} : demanda do equipamento no estado ligado.

Nesse modelo, o coeficiente térmico α e a variável de estado m devem ser determinados a cada passo de resolução do problema.

Aplicando tais conceitos, o modelo de um equipamento termostático qualquer pode ser derivado a partir de uma única classe-mãe, cujas características principais estão representadas pelo seu diagrama de classe, descrito na figura 9.

Os atributos básicos da classe **dispositivo_termostático** são:

- **Alfa_warm** (α_w): coeficiente de aquecimento do dispositivo temostático.
- **Alfa_cold** (α_c): coeficiente de resfriamento do dispositivo temostático.
- **Temperature** (T): temperatura de referência.
- **T_max** (T_{mx}): limite de temperatura máxima.

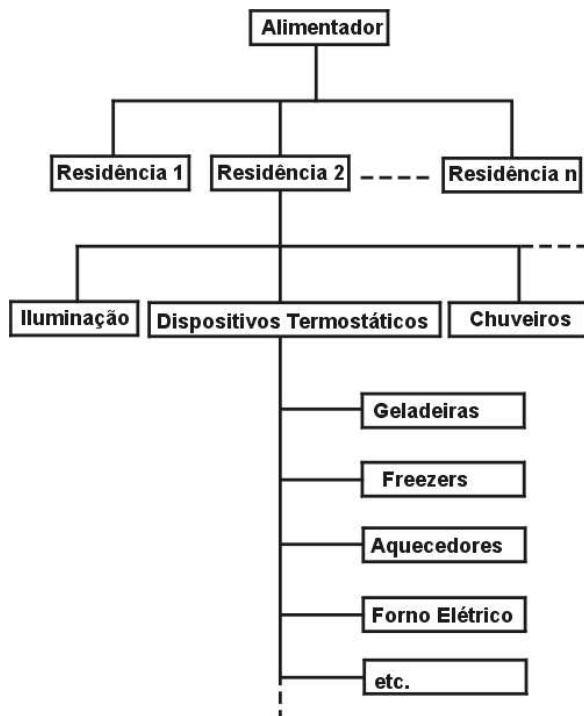


Figura 10: Agregação hierárquica da carga no alimentador e derivação de equipamentos através de herança

- **T_{min}** (T_{mn}): limite de temperatura mínima.
- **T_{ext}** (T_{ext}): temperatura ambiente.
- **Carga** (P): Carga associada ao dispositivo no seu estado ativado.

Os métodos básicos da classe **dispositivo_termostático** são:

- **Set_clock**: função responsável pela atualização da variável “tempo” dos objetos.
- **Calc_state**: função responsável pela determinação do estado atualizado (ligado ou desligado) do dispositivo termostático.
- **Calcula_temp**: função responsável pela atualização da temperatura de referência do equipamento.
- **Get_demanda**: função responsável pelo retorno da demanda atualizada dos dispositivos em cada residência.

A partir da classe **dispositivo_termostático**, pode-se então derivar classes-herdeiras que correspondem aos diferentes equipamentos residenciais, conforme ilustrado

na figura 10. Essas classes herdeiras fazem uso das funcionalidades básicas definidas na classe-mãe, além de métodos próprios inerentes a cada uma delas. Desta maneira, esses dispositivos podem ser tanto de aquecimento quanto resfriamento, bastando alterar as características de ativação e coeficientes térmicos na sua definição. Além dessas classes, foram criadas também as classes **residência** e **alimentador**, realizando a agregação dos equipamentos de maneira hierárquica, em dois níveis. Isto corresponde a dizer que a demanda dos equipamentos individuais é primeiro integralizada nos objetos “residência” a que estão relacionados e a partir da totalização da demanda destes é obtida a demanda total do alimentador.

Como anteriormente, pode-se derivar herdeiras das classes **residência** e **alimentador** para representar objetos com um grau de funcionalidades mais elevado que os disponibilizados nas classes básicas. O diagrama básico da classe **residência** está descrito na figura 11:

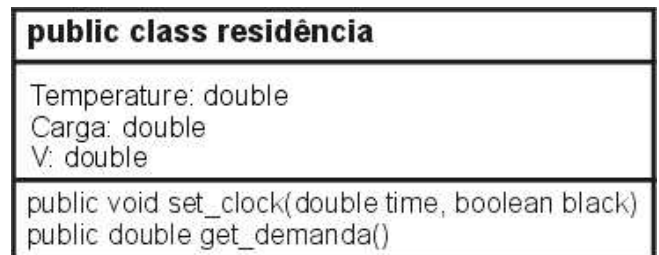


Figura 11: Diagrama da classe residência.

Os atributos básicos da classe **residência** são:

- **Temperature** (T): temperatura de referência do interior da residência.
- **Carga** (P): Carga total associada à residência em um determinado instante de tempo.
- **V**: nível de tensão associado ao ponto principal de alimentação da residência.

Os métodos básicos da classe **residência** são:

- **Set_clock**: função responsável pela atualização da variável “tempo” da residência.
- **Get_demanda**: função responsável pelo retorno da demanda atualizada total de cada residência.

Analogamente, o diagrama da classe **alimentador** está descrito na figura 12:

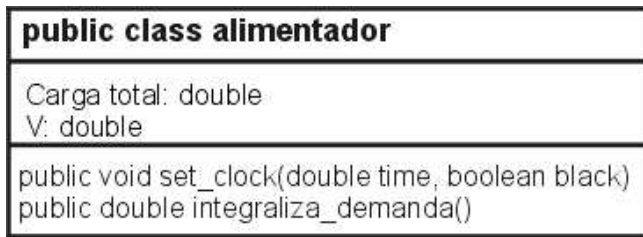


Figura 12: Diagrama da classe alimentador

Os atributos básicos da classe **alimentador** são:

- **Carga total** (P): carga total associada ao alimentador em um determinado instante de tempo.
- **V**: nível de tensão associado ao alimentador.

Os métodos básicos da classe **alimentador** são:

- **Set_clock**: função responsável pela atualização da variável “tempo” do alimentador.
- **integraliza_demanda**: função responsável pelo retorno da demanda atualizada integralizada requerida do alimentador.

A partir destas definições, a carga agregada em uma residência é dada por:

$$P_i^R = \sum_{e=1}^{N_{eq}} P_i^e \quad (5)$$

E a carga agregada em um alimentador é dada por:

$$P_i^A = \sum_{R=1}^{N_r} P_i^R \quad (6)$$

em que:

- P_i^A é a carga do equipamento e ,
- P_i^R é a carga da residência R ,
- P_i^A é a carga do alimentador A , calculados no instante i .

Outra grande vantagem da aplicação de programação orientada a objetos na modelagem física dos equipamentos residenciais é o elevado grau de flexibilidade que a mesma proporciona quanto às definições de um problema. Em outras palavras, o emprego de orientação

a objetos permite que sejam definidos, com facilidade, equipamentos termostáticos com diferentes características conectados a um mesmo alimentador. Essa característica possibilita a livre adoção de diferentes modelagens para a potência individual consumida durante o ciclo ligado dos dispositivos enfocados, podendo variar com o tempo. O emprego de tais modelos, entretanto, aumenta a complexidade do algoritmo, requerendo uma etapa adicional de atualização de potência a cada passo de resolução do problema. Nesse trabalho, os equipamentos foram considerados com potência individual constante, simplificando as etapas de cálculo da demanda agregada. Além disto, podem ser incluídos objetos “residência” de maneira heterogênea (diferentes uns dos outros) além da diversidade de características externas que dependem da localização geográfica dos equipamentos e residências (como variações na temperatura ambiente de uma região para outra no alimentador).

Para exemplificar a influência de variáveis externas, considerou-se no modelo a dependência da variação da temperatura interna do dispositivo (variável de controle) com relação à temperatura ambiente. A variação, neste caso, foi considerada linear com relação à diferença entre as duas temperaturas, obtidas de forma recorrente nos pontos de integralização da demanda do alimentador:

$$T_i = T_{i-1} + \alpha \cdot \Delta t - \alpha_e \cdot (T_e - T_{i-1}) \quad (7)$$

onde as variáveis são definidas como nas equações [3] e [4] e T_e é a temperatura externa definida para para cada equipamento termostático individualmente.

6 IMPLEMENTAÇÃO E RESULTADOS

A linguagem de programação utilizada na implementação dos objetos foi a linguagem Java, empregando-se nas simulações um microcomputador PC Pentium III, 450 Mhz, com o sistema operacional Linux, distribuição Red-Hat 6.1.

Os equipamentos considerados nos testes foram dispositivos de refrigeração, mais comuns em países de clima como o Brasil. Foram utilizadas duas classes, para refrigeradores/freezers e para aparelhos de ar condicionado, utilizando parâmetros derivados dos valores típicos de demanda e tempo de utilização destes equipamentos, reproduzidos parcialmente na tabela a seguir (PROCEL, 2002):

O algoritmo utilizado para o cálculo da demanda no alimentador consiste na realização dos passos descritos a seguir:

1. Inicialização dos objetos (dispositivos termostáti-

Tabela 1: Características de equipamentos residenciais

Aparelho Elétrico	Potência Média Watts	Dias Estimados Uso/Mês	Média Utilização por dia	Consumo Médio mensal (KWh)
Ar condicionado 7500 BTU	1000	30	8 h	180
Ar condicionado 10000 BTU	1350	30	8 h	243
Ar condicionado 12000 BTU	1450	30	8 h	348
Ar condicionado 15000 BTU	2000	30	8 h	360
Ar condicionado 18000 BTU	2100	30	8 h	378
Freezer vertical/horizontal	200	-	-	80
Frigobar	70	-	-	25
Geladeira 1 porta	200	-	-	45
Geladeira 2 portas	300	-	-	80

cos, residências e alimentadores).

2. Distribuição do estado inicial dos dispositivos aleatoriamente que, para uma determinada classe de dispositivos, é equivalente à proporção entre o tempo ligado (t_{on}) ou o tempo desligado (t_{off}) com relação ao tempo total do seu ciclo termostático (t_{ciclo}):

Seja $t_{ciclo} = t_{on} + t_{off}$

Então estado = randn[0,1] (função distribuição aleatória no intervalo [0,1])

Se estado < $\frac{t_{on}}{t_{ciclo}}$, então o dispositivo está ligado

Caso contrário, o dispositivo está desligado.

3. Distribuição da temperatura inicial dos dispositivos de maneira uniforme, em função do seu estado inicial.

Sejam:

T_{mx} : limite de temperatura máxima.

T_{mn} : limite de temperatura mínima.

T : temperatura de referência.

Então se o dispositivo está ligado:

$$T = T_{min} + \text{randn}[0, 1] \cdot (T_{max} - T_{min})$$

Senão (o dispositivo está desligado):

$$T = T_{max} - \text{randn}[0, 1] \cdot (T_{max} - T_{min})$$

4. Inicialização do contador de iterações $i = 1$.
5. Cálculo da temperatura de referência de cada dispositivo em função do passo de simulação.
6. Verificação de limites e mudança no estado do dispositivo.
7. Inclusão e cálculo do efeito de variáveis externas no estado operacional de cada dispositivo.
8. Atualização dos coeficientes térmicos de acordo com os estados atualizados para o dispositivo.
9. Realização do cálculo da demanda de cada dispositivo individualmente e integralização da demanda nas residências.
10. Integralização da demanda de cada alimentador.
11. Incremento do contador de iterações $i = i + 1$.
12. Retorno ao item (5) até que o tempo de simulação (número de iterações total) esteja esgotado.

Foram realizadas simulações para um alimentador genérico contendo 1000 aparelhos termostáticos de refrigeração (geladeiras, freezers e aparelhos de ar condicionado), utilizando uma distribuição uniforme do estado de funcionamento e das temperaturas iniciais de simulação para o universo de equipamentos. Esse alimentador

contém 500 residências com 2 aparelhos termostáticos cada uma. Foram consideradas apenas as cargas controladas termostaticamente na integralização da demanda total.

Inicialmente foi simulada a ocorrência de blecautes de curta duração (até 30 minutos) a partir da décima hora. A figura 13 ilustra as curvas obtidas para interrupções de 5, 10, 20 e 30 minutos:

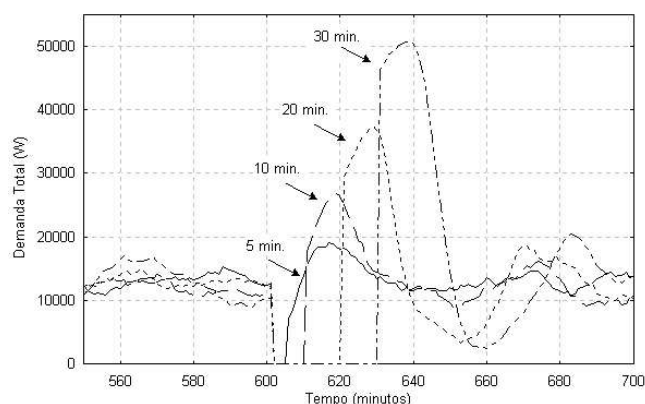


Figura 13: Interrupções de curta duração para 1000 equipamentos de refrigeração

Através dessa simulação, é possível verificar que o nível de sobrecarga no alimentador logo após o restabelecimento de energia é tanto maior quanto maior for o tempo de duração da interrupção. Em outras palavras, ocorre uma perda gradativa da diversidade entre os equipamentos termostáticos com o aumento do tempo de blecaute que se reflete no aumento do pico de demanda nos instantes imediatamente posteriores ao restabelecimento da carga.

A seguir, foi simulada a ocorrência de blecautes de longa duração (maiores que 30 minutos) a partir da décima hora. A figura 14 ilustra as curvas obtidas para interrupções de 60, 90 e 120 minutos:

Diferentemente do caso anterior, nessa situação ocorre o aparecimento de uma patamar de demanda logo após o restabelecimento de energia que se sustenta por um tempo proporcional à duração da interrupção. Este patamar corresponde ao valor máximo de demanda relativo aos dispositivos termostáticos e acontece em função da total perda da diversidade entre os equipamentos.

Em ambas as situações, a demanda no alimentador no momento do restabelecimento é maior que em regime, podendo chegar a 3 ou 4 vezes o valor da demanda em condições normais de operação. O conhecimento prévio

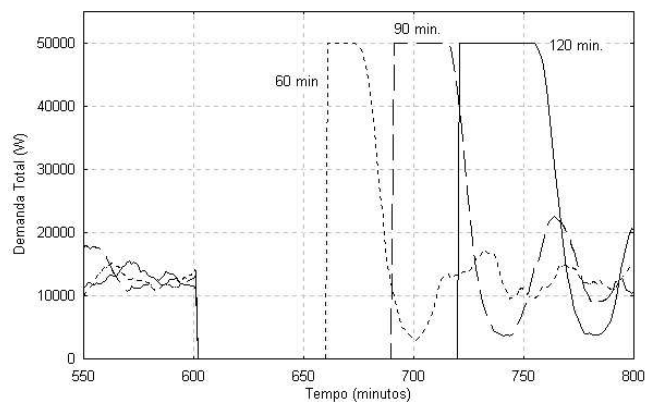


Figura 14: Interrupções de longa duração para 1000 equipamentos de refrigeração

desta demanda anormal e da sua duração é extremamente importante nas fases de recomposição do sistema elétrico. No Brasil, a recomposição do sistema é dividida em duas fases distintas: a fase fluente e a fase coordenada.

A fase fluente consiste na primeira etapa de reenergização da rede elétrica, sendo executada de maneira independente por cada empresa na sua área de concessão visando restabelecer unidades geradoras e linhas de transmissão que constituam ilhas enegizadas.

Já a fase coordenada corresponde a uma etapa posterior aos procedimentos da fase fluente, consistindo na interligação das áreas restabelecidas durante a fase fluente e na recomposição do restante do sistema que porventura se encontre desenergizado. Esta fase é executada de maneira centralizada, através da coordenação geral das ações de cada concessionária do sistema interligado.

Em especial, o sistema se encontra bastante vulnerável durante as primeiras etapas da fase fluente, tendo em vista o baixo grau de interligação da rede. Para se guiar durante esta fase, os operadores contam, em geral, com um conjunto de planos previamente estabelecidos que descrevem os passos para a reenergização dos alimentadores principais. Entretanto, dependendo das características de cada interrupção, tais instruções devem ser flexibilizadas para se adaptarem a cada situação específica. Neste caso, o operador deve estar ciente da diferença entre o valor de demanda imediatamente anterior ao blecaute e a potência que será exigida da rede no instante da reenergização do alimentador, sob o risco de provocar novos colapsos a partir de uma tomada excessiva de carga de uma só vez. No caso de alimentadores em áreas residenciais, os equipamentos termos-

táticos provocam tal aumento temporário na demanda pós-blecaute.

Posteriormente, foi simulada uma interrupção de 60 minutos a partir da décima hora, para um alimentador com 2000 equipamentos termostáticos, sob diferentes valores de temperatura externa. A figura 15 ilustra os resultados obtidos para temperaturas de 15, 25 e 32 graus:

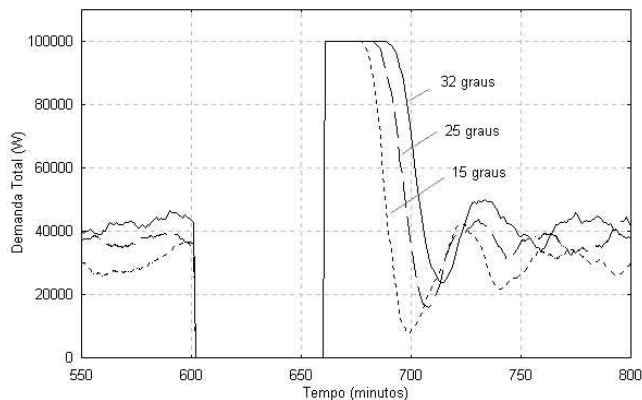


Figura 15: Influência da temperatura externa para 2000 equipamentos de refrigeração

Neste caso, a temperatura externa tem influência em duas situações distintas: a primeira é na situação em regime onde, tendo-se em vista que os equipamentos implementados são de resfriamento, a demanda em condições normais de operação aumenta ligeiramente com o aumento da temperatura. A segunda situação em que ocorre a influência da temperatura externa é no nível de sobrecarga após o restabelecimento da carga, onde a duração do patamar de demanda máxima aumenta com a elevação da temperatura. Em outras palavras, a temperatura externa do ambiente influi na diversidade dos equipamentos termostáticos de um alimentador, através da alteração no ciclo térmico dos dispositivos, como previsto na equação [7].

Finalmente, foram obtidos os tempos computacionais requeridos para um passo de simulação de 1 minuto, com um tempo total de 30 horas (totalizando 1800 pontos de integralização da demanda) utilizando um único alimentador com um número variável de dispositivos termostáticos de refrigeração:

Embora esses tempos possam ser excessivos para aplicações em tempo real, eles podem ser considerados satisfatórios para o objetivo da aplicação desenvolvida, que é a previsão do comportamento da carga para o planejamento da recomposição de sistemas elétricos de distri-

Tabela 2: Tempos médios de simulação de um alimentador contendo dispositivos termostáticos de refrigeração

Número de componentes termostáticos	Tempo médio de simulação (s)
1000	3.2
2000	7.1
5000	17.3
10000	33.8

buição, onde o fator tempo possui um impacto reduzido.

7 CONCLUSÕES

Este trabalho tratou da modelagem da carga na recomposição de sistemas de energia elétrica. Foi analisado o comportamento de cargas residenciais controladas termostaticamente, ou seja, geladeiras, freezers e aparelhos de ar condicionado, principais responsáveis pelo aumento da demanda no processo de restabelecimento de energia.

Foi obtido, para esses equipamentos, um modelo orientado a objetos que permitiu a inclusão da influência de variáveis externas, como, por exemplo, a temperatura ambiente. Através do mecanismo de herança, é possível, ainda, derivar classes tanto para equipamentos de resfriamento, quanto para equipamentos de aquecimento.

Uma vez que cada equipamento foi modelado individualmente, é possível a preservação da heterogeneidade de condições operativas para cada componente, permitindo delinear cenários mais detalhados que no caso da modelagem convencional (identificação da curva agregada total).

Os resultados obtidos são coerentes com os resultados encontrados na literatura. Pôde-se observar que, para blecautes de curta duração (até 30 minutos), o pico de demanda no momento do restabelecimento de energia aumenta conforme a duração do blecaute. Entretanto, para blecautes longos (acima de 30 minutos), ocorre a perda total de diversidade entre os equipamentos controlados termostaticamente e, portanto, o pico de demanda não cresce conforme a duração da interrupção, mas se sustenta por um período maior de tempo.

Além disso, a abordagem orientada a objetos revelou-se bastante robusta com relação aos valores de inicialização do estado dos dispositivos termostáticos, conduzindo a simulação à mesma condição de diversidade em regime para diferentes condições iniciais.

Assim, o conhecimento das características da demanda

pós-blecaute (valor máximo, duração e comportamento com o passar do tempo) é de extrema importância durante as fases da recomposição da rede (em especial, durante a fase fluente) para evitar novos colapsos do sistema, o aumento da duração da interrupção e do desconforto dos consumidores.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo suporte financeiro no desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Adibi, M. M. (2000). *Power System Restoration – Methodologies and Implementation Strategies*. IEEE Press.
- Adibi, M. M.; Borkoski, J. N. and Kafka, R. J (1994). Analytical Tool Requirements for Power System Restoration, *IEEE Transactions on Power Systems*. Vol. 9, No. 3, pp.1582-1591.
- Agneholm, E. (1999). *Cold load pick-up*, PhD Thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.
- Campione, M. and Walrath, K. (1996). *The JavaTM Tutorial - Object-Oriented Programming for the Internet*, Addison-Wesley.
- Capasso, A., et.al. (1994). A bottom-up approach to residential load modeling. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 9, No. 2, pp.957-964.
- Hatziargyriou, N. D. and Papadopoulos, M. (1991). Cold Load Pickup Studies in Extended Distribution Networks. *Proceedings of 6th Mediterranean Electrotechnical Conference*.
- Ihara, S. and Schweppe, F. C. (1981). Physically Based Modeling of Cold Load Pickup. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. Vol. 100, No. 9, pp.4142-4150.
- Jardini, J.A. and Casolari, R. P. (1999). *Curvas de carga de consumidores e aplicações na engenharia da distribuição*. Relato das pesquisas realizadas no CED (Centro de Excelência em Distribuição de Energia Elétrica), São Paulo.
- McDonald, J. E.; Bruning, A. M. and Mahieu, W. R. (1979). Cold Load Pickup. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. Vol. 98, No. 4, pp.1384-1386.
- Monticelli, A. and Wu, F. (1988). Analytical Tools for Power System Restoration – Conceptual Design. *IEEE Transactions on Power Systems*. Vol. 3, No. 1, pp.10-16.
- Mortensen, R. E. and Haggerty, K. P. (1990). Dynamics of Heating and Cooling Loads: Models, Simulations and Actual Utility Data. *IEEE Transactions on Power Systems*. Vol. 5, No. 1, pp.243-249.
- PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica, *Estimativa de Consumo Mensal dos principais Eletrodomésticos*, capturado em 18/04/2002 em <http://www.eletrobras.gov.br/procel/11.htm>.
- Rumbaugh, J. (1991). *Object Oriented Modeling and Design*. Prentice-Hall.